Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 94 (2003)
Heft: 15

Artikel: Wassergehalt und Polymerisationsgrad in der Feststoffisolation
Autor: Liebfried, Thomas / Breitenbauch, Bernd / Buerschaper, Bernd
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-857573

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 30.06.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Wassergehalt und Polymerisationsgrad in der Feststoffisolation

Profil von Wassergehalt und Polymerisationsgrad in der Feststoffisolation von Leistungstransformatoren und Effektivität der LFH-Trocknungstechnik[1)]

Viele der heute betriebenen Leistungstransformatoren haben ein Alter von 30 Jahren und mehr erreicht. Der Wassergehalt in der Feststoffisolation dieser Transformatoren ist von zunehmender Bedeutung für die Lebensdauer. Die Lebensdauer eines Transformators wird unter anderem durch die mechanische Festigkeit des Isolationssystems bestimmt. Diese hängt direkt mit der Kettenlänge der Zellulosemoleküle zusammen, aus denen die Feststoffisolation besteht. Einlagerung von Wasser in die Feststoffisolation führt zu einer beschleunigten Spaltung der Zellulosemolekülketten, was die mechanische Festigkeit der Feststoffisolation verringert. Damit steigt das Risiko einer mechanischen Schädigung des Transformators bei transformatornahen Netzkurzschlüssen.

Durch eine Aktivteiltrocknung wird dem Transformator Wasser entzogen, wodurch die Spaltung der Zellulosemoleküle verlangsamt wird. Für die Untersuchung von Alterungsvorgängen in Leistungstransformatoren ist die räumliche Verteilung des Wassergehaltes der Feststoffisolation von Interesse. Ein Mass für die (mittlere) Länge der Zellulosemolekülketten ist der als DP-Wert bezeichnete *Degree of Polymerization*[2)]. Bei der Untersuchung von Alterungsvorgängen interessiert vor allem dieser Wert in den einzelnen Bereichen des Isolationssystems – also seine räumliche Verteilung[3)].

Thomas Leibfried, Bernd Breitenbauch, Bernd Buerschaper, Olena Kleboth-Lugova, Thomas Lainck, Jürgen Leißner, Harry Lütke, Uwe Thieß, Silvio Truant

Die Wicklungen eines 31,5-MVA-Transformators (110 kV/60 kV–20 kV) wurden in einem umfangreich angelegten Versuchsprogramm vor und nach der Aktivteiltrocknung Stück für Stück zerlegt. Dabei wurden Materialproben entnommen und analysiert. Im vorliegenden Beitrag werden erste Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt.

Einfluss des Wassergehaltes in der Feststoffisolation auf deren Alterung

Der DP-Wert der Feststoffisolation liegt in neuwertigem Zustand bei über 1000 und verringert sich im Verlaufe des Betriebes auf Werte von unter 200. Die mechanische Festigkeit der Feststoffisolation ist bei einem DP-Wert von 200 so stark verringert, dass die Gefahr einer Deformation von Wicklungen durch die bei einem transformatornahen Netzkurzschluss wirksamen Stromkräfte so stark angestiegen ist, dass man solche Transformatoren ausser Betrieb nimmt. Die Geschwindigkeit, mit der sich der DP verringert, wird von vielen Faktoren bestimmt. Zu nennen ist in erster Linie die Temperatur: Es ist seit langem bekannt, dass zu hohe Temperaturen eine starke Reduktion des DP bewirken. Weitere Parameter sind die Einwirkung von Säuren sowie die Einwirkung von Sauerstoff auf die Zellulose. Diese organischen Säuren, deren Hauptbestandteil Essigsäure in einigen Fällen durch chemische Analysen nachgewiesen wurde, entstehen durch die Alterung (Oxidation) des Öles. Der dritte wichtige Parameter, der sich auf die Geschwindigkeit des DP-Abbaus auswirkt, ist das Wasser in der Feststoffisolation[4)].

Ablauf des Versuches am 31,5-MVA-Transformator

Die E.ON Netz GmbH stellte für den im Folgenden beschriebenen Versuch einen zur Verschrottung anstehenden 31,5-MVA-Transformator mit der Übersetzung 110 kV/60 kV–20 kV zur Verfügung. Der Transformator wurde 1954 bei den damaligen Siemens-Schuckert-Werken in Nürnberg gebaut; bei der Siemens AG waren deshalb sämtliche Konstruktionsunterlagen verfügbar. Das umfangreiche Versuchsprogramm wurde in Kooperation mit der E.ON Netz GmbH, der Siemens AG, der artec Energie- und Umwelttechnik GmbH, der Weidmann AG (Rapperswil, Schweiz) und dem Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik der Universität Karlsruhe abgearbeitet.

Es bestand aus den folgenden Schritten:

- Kontrolle und Dokumentation der Betriebsparameter (Temperatur, Öl-Kennwerte) über mehrere Wochen vor Versuchsbeginn;
- Abrüstung des Transformators[5)];
- Ablassen des Öls, Ausbau des Aktivteils, schrittweise Demontage des Wicklungsblocks der Phase W zur Entnahme der Materialproben. Der Wicklungsblock dieser Phase wird vollständig bis auf den Kern abgebaut;
- Herstellen einer einphasigen Schaltung der noch vorhandenen Wicklungsblöcke der Phasen U und V. Der nunmehr einphasige Transformator wird wieder mit Öl gefüllt und für die Aktivteiltrocknung vorbereitet;

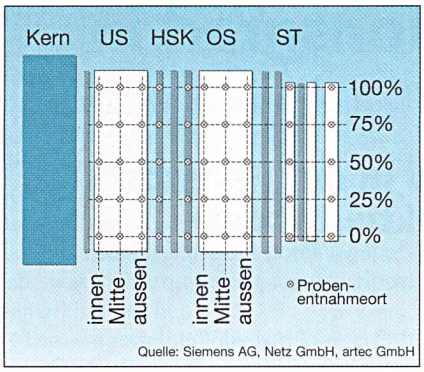

Bild 1 Schematisch dargestellter Aufbau eines Schenkels des 31,5-MVA-Transformators mit den Probenentnahmestellen für die Bestimmung des Wassergehaltes

HSK: Hauptstreukanal; OS: Oberspannungswicklung (Scheibenspulenwicklung); ST: Stufenwicklung (Lagenwicklung); US: Unterspannungswicklung (Scheibenspulenwicklung)

- Aktivteiltrocknung (LFH-Trocknung, Smart Dry) des nunmehr einphasigen Transformators;
- Ausbau des Aktivteils, schrittweise Demontage des Wicklungsblocks Phase U zur Entnahme der Materialproben. Der Wicklungsblock dieser Phase wird vollständig bis auf den Kern abgebaut;
- Aktivteiltrocknung der Phase V und Ausbau des Aktivteils sowie schrittweise Demontage des Wicklungsblocks dieser Phase zur Entnahme der Materialproben.

Mit diesem Versuch sollten einerseits das Feuchteprofil und das Profil des DP-Wertes in der Feststoffisolation und andererseits die Auswirkungen der Aktivteiltrocknung durch die Vakuumtrocknung in Kombination mit der LFH-Technik auf das Feuchteprofil ermittelt werden. Insbesondere sollte festgestellt werden, in welchem Umfang und in welcher räumlichen Verteilung ein Wasserentzug erfolgt, und es sollte der Nachweis erbracht werden, dass die Aktivteiltrocknung mit dieser speziellen Methode keine zusätzlichen Alterungseffekte hervorruft.

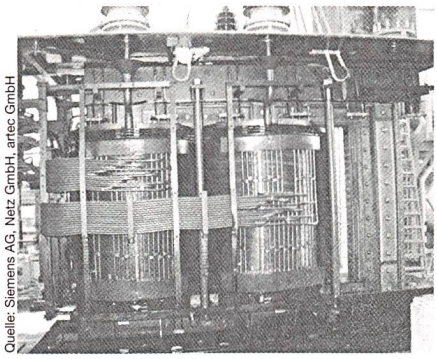

Bild 2 Transformator in 1-phasiger Anordnung, d.h. mit vollständig abgebautem Wicklungsblock der Phase W

Verteilung des Wassergehaltes in der Feststoffisolation des 31,5-MVA-Transformators

Bild 1 zeigt schematisch den Aufbau eines Schenkels des Transformators und die Probenentnahmestellen, an welchen der Wassergehalt (F in %) in der Feststoffisolation (im Papier und im Pressspan) bestimmt wurde. Bei den entnommenen Materialproben wurde der Wassergehalt durch die Karl-Fischer-Titration[6)] bestimmt. Dabei wurde eine Doppelbestimmung durchgeführt, d.h. der schliesslich resultierende Wert ergab sich aus der Analyse von zwei Proben eines jeden entnommenen Materialstückes.

Die Stufenwicklung (ST-Wicklung) des Transformators bestand aus 3 einzelnen Röhren und war als Lagenwicklung ausgeführt. Unterspannungs- und Oberspannungswicklungen (US- bzw. OS-Wicklung) waren Scheibenspulenwicklungen. Die in Bild 1 dargestellten Zylinder waren aus einzelnen, 1 mm dicken Segmenten zusammengesetzt, die – einander überlappend – einen Zylinder mit einer bestimmten Stärke (zwischen 4 mm und 9 mm) bildeten. Dies ist ein deutlicher Unterschied zu den seit vielen Jahrzehnten verwendeten Zylinderanordnungen, die aus einem Stück in der gewünschten Materialstärke bestehen und die Wicklung vollständig (360°) umfassen.

In Bild 2 ist der Transformator in 1-phasiger Anordnung zu sehen, d.h. der Wicklungsblock der Phase W ist vollständig bis auf den Kern abgebaut.

In Bild 3 ist der Wassergehalt (F in %) über der Wicklungslänge dargestellt. Aus den jeweiligen Messpunkten in jeder Ebene der US-Wicklung, des Streukanals, der OS- und der ST-Wicklung werden Mittelwerte gebildet. Die in den Diagrammen dargestellten Punkte ergeben sich also im Falle der US- und der OS-Wicklung als Mittelwerte aus 3 Messwerten und im Falle des Streukanals und der ST-Wicklung als Mittelwert aus 2 Messwerten in jeder der 5 Ebenen bei 0%, 25%, 50%, 75% und 100% der Wicklungslänge. In den Diagrammen für die Wicklungen sind zusätzlich zu den Mittelwerten der Messpunkte Interpolationsgeraden durch die 3 Messwerte bei 25%, 50% und 75% der Wicklungslänge eingezeichnet. Im Falle des Streukanals wurden alle Werte bei der Interpolation berücksichtigt. Dabei ergibt sich vor der Trocknung ein nach oben leicht abfallender Wert für den Wassergehalt in der Feststoffisolation. Dies liegt daran, dass der gesamte Wicklungsaufbau im Betrieb am oberen Ende wärmer ist als am unteren. Durch die Erwärmung wird das Wasser zum oberen Ende der Wicklung hin aus der Feststoffisolation etwas verdrängt, wodurch sich insgesamt eine Zunahme des Wassergehaltes in der Fest-

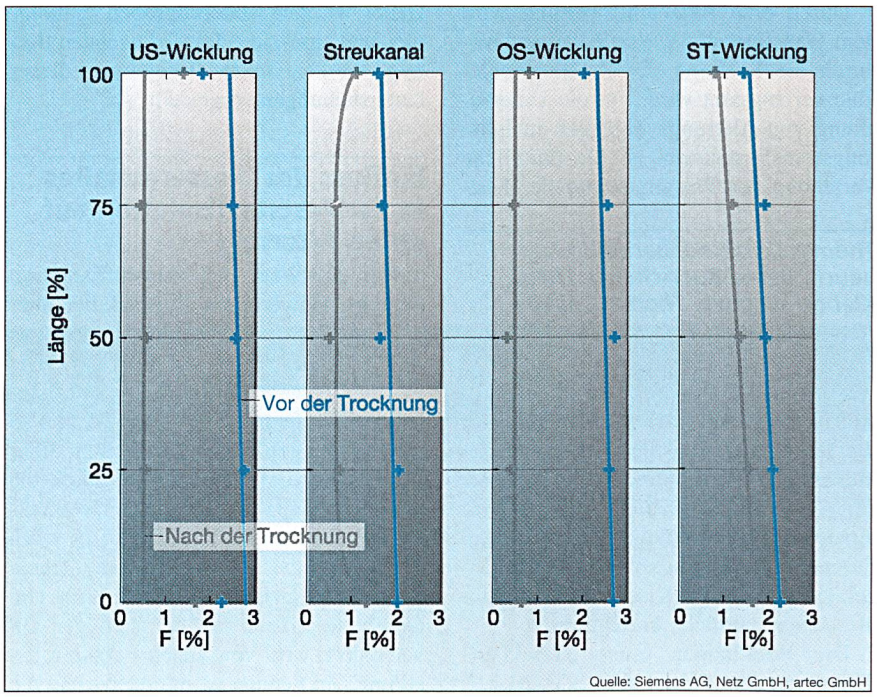

Bild 3 Verteilung des Wassergehaltes in der Feststoffisolation des Schenkels W vor und des Schenkels U nach der Aktivteiltrocknung

F: Wassergehalt

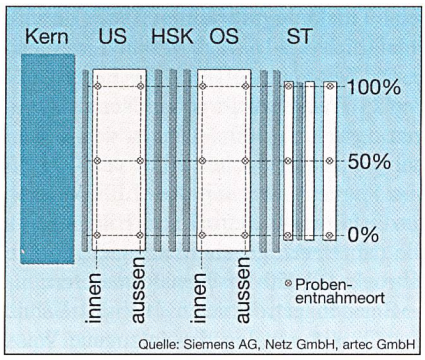

Bild 4 Orte, an denen die Materialproben entnommen wurden, für die der Polymerisationsgrad (DP-Wert) bestimmt wurde

HSK: Hauptstreukanal; OS: Oberspannungswicklung (Scheibenspulenwicklung); ST: Stufenwicklung (Lagenwicklung); US: Unterspannungswicklung (Scheibenspulenwicklung)

stoffisolation von oben nach unten einstellt. Ein derartiger Gradient des Wassergehaltes stellt sich im Verlaufe der Betriebszeit ein.

Der Wassergehalt im Isoliermaterial an den Randbereichen nach der Trocknung weicht bei der US-Wicklung und im Hauptstreukanal deutlich von der Interpolation ab. Die OS- und die US-Wicklung war auf einer Länge von etwa 100 mm am oberen und unteren Ende verklebt (Werte bei 0% und 100%). An den verklebten Stellen ist der Wassergehalt deutlich unterschiedlich zu den Werten bei 25%, 50% und 75% der Wicklungslänge. Bei der US-Wicklung ist dieser Effekt auch schon in der Verteilung des Wassergehaltes über der Wicklung vor der Trocknung gut erkennbar. Offensichtlich behindert die Verklebung an den Randbereichen der US-Wicklung das Austreten von Wasser trotz des während der LFH-Trocknung um die Feststoffisolation anstehenden Vakuums mit einem Druck von etwa 1 mbar. In Bild 3 wurden deshalb die nach der Trocknung ermittelten Messwerte an den Randbereichen der US-Wicklung für die Bestimmung der Interpolationsgeraden ignoriert. Für den vorliegenden Transformator entsprechen diese Messwerte zwar der Realität, die Verklebung der Randbereiche von Wicklungen ist jedoch eher untypisch für Transformatoren, die ab etwa den 60er-Jahren gebaut wurden. Bei den Zylindern des Hauptstreukanals ergibt sich in den Randbereichen ein geringerer Wasserentzug als bei 25%, 50% und 75% der Wicklungslänge auf Grund einer Verdickung der Isolation durch die Überlappung der Zylinder mit Winkelringen und Kappen, welche die Isolation im Endbereich der Wicklungen bilden.

Deutlich sichtbar ist der Wasserentzug infolge der Vakuumtrocknung in Kombination mit der LFH-Technik (Smart Dry). In der US- und der OS-Wicklung werden durchschnittlich Wassergehalte von etwas über 2% des Isolationsgewichtes entzogen, sodass der Restwassergehalt bei etwa 0,5% des Isolationsgewichtes liegt, was dem Neuzustand entspricht. In den weiter von den stromdurchflossenen Wicklungen entfernten Isolierteilen ist der Wasserentzug etwas geringer. So beträgt er in den Zylindern des Hauptstreukanals durchschnittlich etwa 1 bis 1,5%; aber auch hier wird ein Restwassergehalt von deutlich unter 1% erreicht. Lediglich in der ST-Wicklung ist der Wasserentzug geringer, was daran liegt, dass die aussen liegenden Windungen der ST-Wicklung mit einem Isolierlack imprägniert waren, der einen Wasseraustritt behindert.

Die Vakuumtrocknung in Kombination mit der LFH-Technik zeigt also gute Ergebnisse. Das Papier der Wicklungen und sogar die Pressboard-Zylinder werden auf Wassergehalte getrocknet, die in etwa dem Neuzustand entsprechen. Weiter entfernte Isolierteile werden nicht vollständig auf den Neuzustand getrocknet. Im Verlaufe der Betriebszeit eines Transformators nach erfolgter Aktivteiltrocknung ergibt sich ein Ausgleich, sodass sich schliesslich wieder ein ähnliches Profil des Wassergehaltes herausbildet wie vor der Trocknung, nur auf einem deutlich tieferen Niveau.

Vor und nach der Trocknung wurden die Einspannkräfte der Wicklungen überprüft. Dabei wurde vor der Trocknung eine komplette Dejustierung der Einspannkräfte festgestellt. Die Einspannkräfte waren an den 4 Einspannstellen auf die ST-, die OS- und die US-Wicklung völlig unterschiedlich verteilt. Nach der Trocknung wurde der Weg bestimmt, um den die Spannschrauben nachgedreht werden konnten. Dabei ergab sich als Höchstwert ein Weg von 1,5 mm an einer Stelle. Eine derartige Längenänderung ist bereits bei sich ändernder thermischer Belastung der Wicklungen von Leerlauf bis Nennlast gegeben.

Polymerisationsgrad der Feststoffisolation des 31,5-MVA-Transformators

Die DP-Analyse einer Vielzahl von Isolierstoffproben ist sehr zeitaufwändig. Deshalb wurden bislang nur die an der Wicklungsmitte (50%) und an den Wicklungsenden (0% und 100%) entnommenen Materialproben analysiert. Bild 4 zeigt die Orte, an denen Materialproben entnommen wurden, deren Polymerisationsgrad (DP-Wert) bestimmt wurde.

In Bild 5 sind jeweils die DP-Werte der US-, OS- und ST-Wicklung dargestellt. Wie zu erwarten ist, ist der DP-Wert des Papiers am oberen Ende der Wicklungen auf Grund der stärkeren Erwärmung niedriger als am unteren Ende. Dieser Effekt ist bei der OS- und US-Wicklung besonders stark ausgeprägt. Bei der ST-Wicklung hängt es davon ab, in welcher

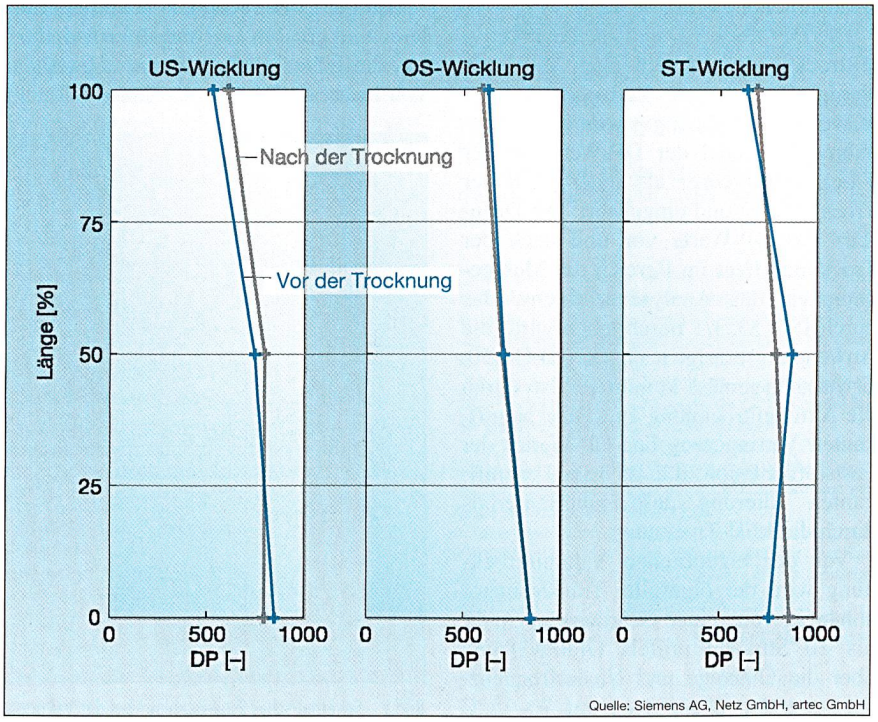

Bild 5 Verteilung des DP-Wertes der Feststoffisolation des Schenkels W vor und des Schenkels U nach der Aktivteiltrocknung

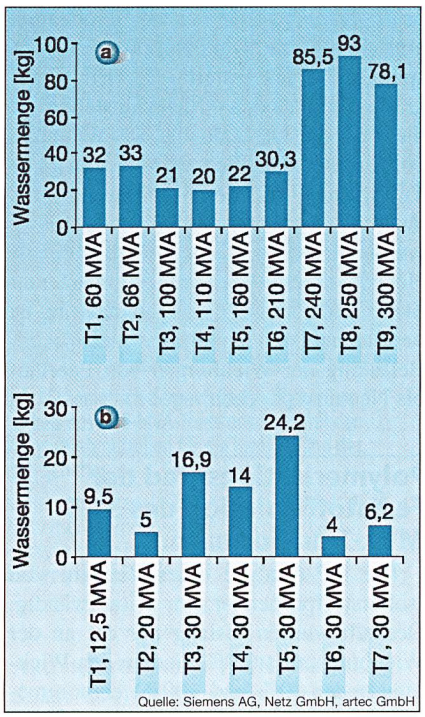

Bild 6 Wasserentzug bei der Trocknung von Transformatoren

Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse mit der Ölumlauf-Vakuumtrocknung in Kombination mit der LFH-Technik. a: Transformatoren < 50 MVA, Abschaltzeit 6–10 Tage; b: Transformatoren > 50 MVA, Abschaltzeit 10–19 Tage.

Stufenschalterstellung der Transformator am häufigsten betrieben wurde. Die Materialproben wurden nicht notwendigerweise jenem Teil der ST-Wicklung entnommen, der mit höchsten Stromdichten betrieben wurde und somit die höchste Beanspruchung erfahren hatte.

Die DP-Werte vor und nach der Aktivteiltrocknung unterscheiden sich nur wenig. Bei genauer Betrachtung stellt man fest, dass abhängig vom Probenentnahmeort einmal der DP-Wert vor der Trocknung grösser als jener nach der Trocknung ist und umgekehrt. Die Differenz der DP-Werte vor und nach der Trocknung liegt im Bereich der Messgenauigkeit des Analyseverfahrens, das durch ISO 5351/1 beschrieben wird; die Anwendung erfolgt nach DIN IEC 450. Erwartungsgemäss kommt es also durch die Aktivteiltrocknung zu keiner signifikanten Verringerung des DP-Wertes der Feststoffisolation, d.h. zu keiner signifikanten Alterung des Isoliermaterials durch die LFH-Trocknung.

Vor der eigentlichen Vakuumtrocknung wird der ölgefüllte Transformator abhängig von seiner Nennleistung in 12 bis 20 Stunden mittels Ölumwälzung über die Ölanlage und Niederfrequenzspeisung der Wicklungen auf 70–75 °C erwärmt. Als Führungsgrösse dient dabei die mittlere Wicklungstemperatur. Nach der Ölentleerung wird der Transformatorkessel evakuiert, bis ein Druck von 1 bis 2 mbar erreicht ist; damit beginnt der eigentliche Trocknungsprozess. Die mittlere Wicklungstemperatur wird nun in 5-°C-Schritten bis auf maximal 90 °C erhöht. Während der gesamten Trocknungszeit von mehreren Tagen wird die mittlere Wicklungstemperatur auf dem vorgegebenen Temperaturniveau von maximal 90 °C gehalten. Bei diesen niedrigen Temperaturen ist eine zusätzliche Alterung gemäss dem Montsinger-Gesetz [1] ausgeschlossen. Demgemäss entspricht einer Heisspunkttemperatur von 98 °C eine Alterungsrate von 1, was eine so genannte «normale» Alterung bedeutet [1]. Die praktisch identischen DP-Werte vor und nach der Aktivteiltrocknung des 31,5-MVA-Transformators belegen also, was theoretisch auch zu erwarten ist: eine Aktivteiltrocknung mit einer maximalen Temperatur der Wicklungen von 90 °C bewirkt keine messbare zusätzliche Alterung. Ausgehend vom Montsinger-Gesetz kann die mittlere Wicklungstemperatur während der Trocknung durchaus auf etwa 100 °C erhöht werden, ohne dass dies dem Transformator schaden würde – vor allem wenn man die Dauer der Aktivteiltrocknung von im Mittel 14 Tagen im Vergleich zur gesamten Betriebszeit eines Leistungstransformators von 40 und mehr Jahren berücksichtigt.

Transformatorentrocknung mit der LFH-Technik

Mit der LFH-Technik können bei mittleren und grossen Leistungstransformatoren die erforderlichen Trocknungszeiten von mehreren Wochen bei konventionellen Trocknungsverfahren auf durchschnittlich 12–16 Tage verkürzt werden. In der Zeit von April 1997 bis heute wurden 25 Transformatoren mit Nennleistungen von 12,5–300 MVA in den Spannungsebenen zwischen 30 kV und 400 kV von Siemens/artec mit dem LFH-Verfahren erfolgreich getrocknet. Bild 6 zeigt die dabei entzogenen Wassermengen der getrockneten 50-Hz-Transformatoren.

Bei den getrockneten $16^2/_3$-Hz-Bahntransformatoren lag die entzogene Wassermenge meistens unter 10 l. Diese relativ gering erscheinende Wassermenge bedeutet für diese Transformatoren mit einem Isolationsgewicht von nur wenigen 100 kg etwa dieselbe Verbesserung des Zustandes wie ein relativ dazu höherer Wasserentzug von einigen 10 l für grosse Transformatoren mit einem Isolationsgewicht von 10 t und darüber.

Bild 7 zeigt schematisch die bei der Vakuumtrocknung in Kombination mit der LFH-Technik wichtigen Prozessgrössen. Der Transformator wird im ölbefüllten Zustand zunächst auf etwa 70 °C erwärmt und thermisch stabilisiert, wodurch eine gleichmässige Erwärmung des gesamten Aktivteils erreicht wird. Nach erreichter Stabilisierung wird das Öl aus dem Transformator in Tanks zur Zwischenlagerung und gleichzeitigen Aufbereitung abgepumpt. Es schliesst sich die eigentliche Trocknungsphase an, während der Druck im Transformator auf Werte ≤ 2 mbar abgesenkt wird. Dies bewirkt, dass der Wasserdampfpartialdruck ausserhalb der Feststoffisolation geringer ist als im Feststoff selbst. Das Wasser hat dadurch die Neigung, nach aussen zu treten und den Feststoff zu verlassen. Die Effizienz des Wasserentzuges wird durch

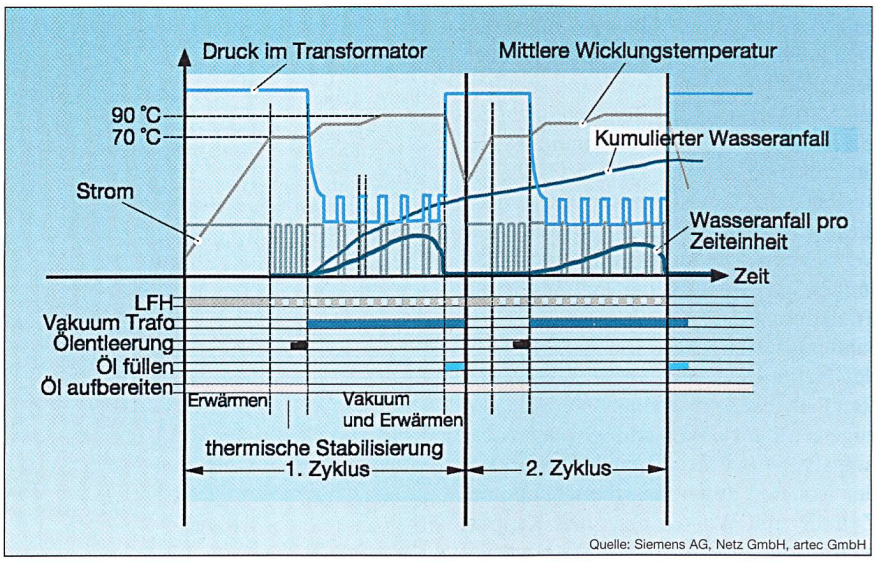

Bild 7 Schematischer Prozessablauf bei der Vakuumtrocknung in Kombination mit der LFH-Technik

Oberhalb der Zeitachse: Darstellung von Strom, Temperatur, Druck und Wasseranfall. Unterhalb der Zeitachse: Darstellung der einzelnen Prozessschritte.

die Druckdifferenz bestimmt. Die Druckdifferenz ist umso grösser, je geringer der Druck im Transformator ist und je höher die Temperatur des Feststoffes ist. Deshalb ist es günstig, mit einer möglichst hohen Temperatur zu arbeiten, ohne jedoch dabei dem Isoliermaterial Schaden zuzufügen. Der dabei zulässige Höchstwert der Temperatur ist durch das Montsinger-Gesetz festgelegt und kann – wie die vorangegangenen Überlegungen gezeigt haben – durchaus etwa 100 °C betragen. Parallel zu der Vakuumtrocknung des Aktivteils erfolgt die Aufbereitung des abgepumpten Isolieröls im Tank.

Die Speisung der OS-Wicklungen des Transformators bei kurzgeschlossenen US-Wicklungen mit einem niederfrequenten Strom mit Frequenzen < 1 Hz (daher LFH, Low Frequency Heating) hat eine Reihe von Vorteilen. Man kann mit sehr niedrigen Spannungen von einigen 100 V einspeisen, da auf Grund der niedrigen Frequenz an der Kurzschlussreaktanz nahezu kein Spannungsabfall entsteht. Dadurch entstehen keine hochspannungstechnisch relevanten Probleme. Ausserdem wird der Aufwand für die Spannungsquelle deutlich verringert. Gleichzeitig ist trotz der niedrigen Frequenz die magnetische Kopplung der OS-Wicklung zur US-Wicklung noch gegeben, sodass auch diese von einem Strom durchflossen und damit erwärmt wird. Durch die Speisung mit einem niederfrequenten Strom kann man ferner davon ausgehen, dass in der Wicklung keine Heissstellen auftreten, wie dies bei Speisung mit Betriebsfrequenz unvermeidbar der Fall wäre. Ohne Streufeld- und Wirbelstromverluste sowie bei fehlendem flüssigem Isoliermedium ist eine gleichmässige Wicklungstemperatur gegeben.

Der gesamte Trocknungsprozess ist in den letzten Jahren, je nach Masse und Feuchte des Feststoffisolationssystems, folgendermassen durchgeführt worden: Aufwärmphase, Ölentleerung, Vakuum ziehen und schliesslich die eigentliche Trocknungsphase mit LF-Heizung der Wicklungen (Bild 7) und anschliessender Ölfüllung.

Prozessoptimierung des Trocknungsverfahrens

Im Zusammenhang mit dem Versuch wurden mögliche Verfahrensoptimierungen der Vakuumtrocknung in Kombination mit der LFH-Technik hinsichtlich der Prozesszeiten diskutiert. Die wichtigsten Parameter beim Smart-Dry-Verfahren sind die Temperatur und das Vakuum. Der erreichbare Unterdruck wird durch die Leckrate des Transformators und durch die zum Einsatz kommende Vakuumpumpe bestimmt. Leckagen, die das Erreichen des notwendigen Unterdruckes verhindern, müssen lokalisiert und abgedichtet werden.

Gemäss dem Montsinger-Gesetz ist eine mittlere Wicklungstemperatur von 100 °C während des Prozesses ohne wesentlichen Lebensdauerverlust durchaus möglich. Die letzte Trocknungsphase des Schenkels V wurde mit einer durchschnittlichen Wicklungstemperatur von 110 °C durchgeführt. Erste DP-Analysen von Materialproben aus dem Isolationsaufbau des Schenkels zeigen, dass dies ohne negative Folgen auf den DP-Wert und damit auf die Struktur der Feststoffisolation geblieben ist.

Aus theoretischen Überlegungen wurde abgeleitet, dass es auch deutliche Feuchteunterschiede zwischen den verschiedenen Isolationsmaterialien geben muss. Dies ist durch den Versuch bestätigt worden. Das Papier der Leiterisolation hatte einen durchschnittlich 1,5 – 2% höheren Wassergehalt als das Isolationsmaterial der «wicklungsferneren» Isolation. Auf Grund dieser Erkenntnis können die Aufwärmphase des Aktivteils unter Öl sowie weitere Ölzyklen entfallen. In Zukunft wird also zuerst die Ölentleerung durchgeführt, und die Erwärmung der Wicklungen erfolgt nur noch durch die Einspeisung des niederfrequenten Stromes.

Referenz

[1] Loading Guide for oil-immersed transformers. International Electrotechnical Commission, IEC, IEC 354, 1972

Angaben zu den Autoren

Prof. Dr.-Ing. **Thomas Leibfried** ist seit Ende 2002 Leiter des Institutes für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik der Universität Karlsruhe. Er war von 1996 bis Ende 2002 bei der Siemens AG im Geschäftsgebiet Transformatoren in verschiedenen Funktionen tätig.
leibfried@ieh.uni-karlsruhe.de

Ing. (grad.) **Bernd Breitenbauch** ist Mitarbeiter der Abteilung Systemtechnik der E.ON Netz GmbH.

Dipl.-Ing. **Bernd Buerschaper** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik der Universität Karlsruhe.

Dr. **Olena Kleboth-Lugova** ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik der Universität Karlsruhe.

Dipl.-Ing. **Thomas Lainck** ist Mitarbeiter der Abteilung Umspannwerke der E.ON Netz GmbH.

Dipl.-Ing. **Jürgen Leißner** ist Leiter des Geräteservice der E.ON Netz GmbH.

Dr. **Harry Lütke** ist seit 1987 im Materiallabor im Transformatorenwerk Nürnberg der Siemens AG beschäftigt. Seit 1990 ist er Leiter dieses Labors.

Dipl.-Ing. **Uwe Thieß** ist Leiter des Profit-Centers Service im Transformatorenwerk Nürnberg der Siemens AG.

Silvio Truant ist Geschäftsführer der artec Energie- und Umwelttechnik GmbH in Leegebruch bei Berlin.

[1] LFH: Low Frequency Heating. Verfahren zur Erwärmung der Wicklungen bei Trocknung der Isolation. Die Isolation wird dabei im Transformatorenkessel getrocknet und muss deshalb nach der Trocknung nicht mehr der Umgebungsluft ausgesetzt werden.

[2] Degree of Polymerization: Polymerisationsgrad. Er gibt die durchschnittliche Anzahl der Glukosemoleküle an, aus denen das Zellulosemolekül besteht.

[3] Die Verteilung des Wassergehaltes und des Polymerisationsgrades ist stark an das axiale und radiale Temperaturprofil der Wicklungen in einem Transformator gekoppelt und damit nicht homogen.

[4] Auch diese Tatsache ist an sich lange bekannt und konnte durch Versuche im Materiallabor der Siemens AG, Transformatorenwerk Nürnberg, erneut bestätigt werden.

[5] Der Transformator wurde für die weiteren Arbeiten in den Geräteservice Nürnberg der E.ON Netz GmbH transportiert.

[6] Titration: Gehalt einer Lösung. Unter Titration wird die Ausführung einer chemischen Messanalyse verstanden, bei welcher die Reagenzlösung tropfenweise zugesetzt wird, bis ein Indikator das Ende der Reaktion anzeigt.

Teneur en eau et taux de polymérisation dans les isolants solides

Profil de teneur en eau et taux de polymérisation dans les isolants solides des transformateurs de puissance et efficacité de la technique de séchage LFH

Beaucoup des transformateurs de puissance actuellement en service ont 30 ans et plus. La teneur en eau de l'isolement solide de ces transformateurs joue un rôle croissant pour la durée de vie. La durée de vie d'un transformateur est déterminée entre autres par la résistance mécanique du système d'isolement. Or celle-ci dépend directement de la longueur de chaîne des molécules de cellulose dont se compose l'isolant solide. L'eau se déposant dans l'isolant solide provoque une fission accélérée des molécules de cellulose réduisant la résistance mécanique de l'isolement. Cela augmente le risque de dommages mécaniques du transformateur lors de court-circuits de réseau proches de celui-ci.

2003/04 mit CD-ROM

Die Schweizerische Elektro- und Elektronik-Industrie

Die 3000 Betriebe der Schweizerischen Elektro- und Elektronik-Industrie und ihrer Lieferanten im Überblick: Firmenadressen mit Fabrikations- und Handelsprogramm, Geschäftsleitung und Verwaltungsräten. Bezugsquellenverzeichnis, Markenverzeichnis und Rubrikenindex in deutsch und französisch.

480 Seiten, broschiert, mit CD-ROM, ISSN 1422-4747, ISBN 3-280-03308-X

orell füssli

Ich bestelle ___ Exemplar(e) «Die Schweizerische Elektro- und Elektronik-Industrie» zu Fr. 95.– inkl. MWST, zzgl. Versandkosten

Firma/Name

Strasse/Nr.

PLZ/Ort

Beruf/Branche

Datum/Unterschrift

Einsenden oder faxen an:
BD Bücherdienst AG, Kobiboden, 8840 Einsiedeln
Tel. 055 418 89 59, Fax 055 418 89 58, of-info@buecherdienst.ch

Code 40

BULLETIN

electrosuisse SEV Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik – Association pour l'électrotechnique, les technologies de l'énergie et de l'information

VSE AES Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
Association des entreprises électriques suisses

Schwerpunkt: Beleuchtung
Point essentiel: Eclairage

23/2002

Fr. 12.–
€ 8,50

Tageslicht für fensterlose Räume
Kommunikationsverkabelung: gestern, heute, morgen
SIA 380/4: Werkzeug für Planung und Kontrolle
PLC – ein Geschäftsfeld für EVU?